УДК 621.452.3.03-226-71 **doi: 10.32620/aktt.2019.8.20**

Р. Ю. ШАКАЛО[1], М. ХАЛИМОНЮК[2]

[1] ***ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина***
[2] ***Технический Институт Военно-Воздушных Сил (ITWL), Варшава, Польша***

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ТВД С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Охлаждаемые рабочие лопатки турбины являются очень сложными, трудоемкими деталями, как для изготовления, так и для контроля. С развитием авиационных газотурбинных двигателей усложняется и конструкция охлаждаемых рабочих лопаток турбины. Для создания новых перспективных охлаждаемых рабочих лопаток турбины требуется внедрение новых передовых технологий изготовления и новых прогрессивных методов контроля. В данной работе рассмотрены существующие методы контроля, которые применяются при изготовлении рабочих лопаток турбины в серийном производстве. Приведены их недостатки и преимущества. Представлены результаты работ, проведенных в рамках международного проекта «AERO.UA». Работы проводились с целью отработки, метода контроля внутренней полости рабочей лопатки турбины высокого давления (ТВД) с перспективной системой охлаждения, разработанной на ГП «Ивченко-Прогресс». Контроль внутренней полости рабочей лопатки ТВД с перспективной системой охлаждения выполнен с помощью компьютерной томографии. Компьютерная томография проведена в Институте технических войск (ITWL) г. Варшава на томографе X-Ray phoenix V|tome|X m фирмы General Electric. По результатам отработки метода контроля показана возможность выявления производственных дефектов, выявление которых в условиях установившегося производства связано с очень трудоемкими контрольными операциями, а в некоторых случаях контроль вовсе невозможен без разрушения детали или без выполнения дорогостоящего ремонта. Выполнена оценка возможности, выполнения контроля геометрических размеров внутренней полости и наружных поверхностей охлаждаемых рабочих лопаток турбины. При использовании компьютерной томографии контроль геометрических размеров возможен с точностью до 0,01 мм. Но для привязки рабочей лопатки к базовым поверхностям, заданных в чертеже при сканировании необходимо использовать специальную оснастку. Для подтверждения возможности контроля геометрических размеров, заданных в чертеже необходимо продолжить работы по сканированию охлаждаемых рабочих лопаток турбины с применением специальных приспособлений.

Ключевые слова: *рабочая лопатка; система охлаждения; компьютерная томография.*

Введение

Охлаждаемые рабочие лопатки турбины являются одними из наиболее сложных деталей газотурбинного двигателя. С развитием газотурбинных двигателей усложняются и системы охлаждения рабочих лопаток турбины [1]. Для изготовления рабочих лопаток турбин с новыми перспективными схемами охлаждения требуются новые методы контроля.

Существующие методы контроля: визуальный, люминесцентный, механический, контроль по расходу воздуха, рентген не всегда позволяют с высокой степенью достоверности выявить отклонения, производственные или эксплуатационные дефекты, что приводит к снижению эффективности охлаждения лопаток турбины а, следовательно, к снижению их ресурса и ресурса турбины в целом [2].

Существует необходимость в отработке новых более точных методов контроля внутренней полости охлаждаемых рабочих лопаток.

Анализ существующих методов контроля

При изготовлении охлаждаемых рабочих лопаток турбины в настоящее время используются такие основные методы контроля:

- визуальный контроль;
- люминесцентный контроль (ЛЮМ1-ОВ);
- механический контроль;
- контроль расхода воздуха;
- вихретоковый контроль;
- 3D-сканирование;
- рентген контроль.

Визуальный контроль

При визуальном контроле выполняется осмотр наружных поверхностей с применением увеличительного стекла и, как правило, ориентирован на выявление механических повреждений при изготовлении. Осмотр внутренних поверхностей лопатки

© Р. Ю. Шакало, М. Халимонюк, 2019

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

возможен с применением эндоскопов. Но применение эндоскопов ограничено геометрией внутренних каналов лопаток и размерами эндоскопа. Поэтому выполнить визуальный осмотр внутренних поверхностей практически невозможно.

Люминесцентный контроль

Люминесцентный контроль выполняют для выявления дефектов типа трещин, раковин несплощностей. Люминесцентный контроль также, как и визуальный контроль выполняется для наружных поверхностей. Контроль внутренних поверхностей невозможен.

Механический контроль

Данный вид контроля применяют для обмеров перфорационных отверстий и щелевых пазов. При контроле используются калибры и щупы. Механический контроль очень трудоемкий, поэтому такой контроль выполняют не на всех лопатках, а на нескольких лопатках от партии.

С помощью калибров выполняется контроль некоторых элементов системы охлаждения, путем контроля стрежня формирующего внутреннюю полость. На окончательно изготовленной лопатке контроль внутренней полости также невозможен.

Контроль расхода воздуха

Контроль расхода воздуха выполняют на окончательно изготовленных рабочих лопатках турбины. Расход воздуха контролируют как суммарный через всю лопатку, так и по отдельным полостям. При наличии отклонений по расходу воздуха можно косвенно судить о нарушении геометрии внутренней полости или перфорационных отверстий.

Вихретоковый контроль

С помощью вихретокового метода выполняют контроль на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов типа нарушения сплошности материала (трещины, раковины, волосовины). Чаще всего данный метод применяют для контроля радиусов входной и выходной кромок. Контроль внутренних поверхностей также не возможен.

3D-сканирование

Наиболее современный из представленных методов контроля. Для контроля используется сканер, который анализирует форму предмета и на основе полученных данных создает его 3D-модель. Созданная 3D-модель сравнивается с номинальной (конструкторской) твердотельной моделью, на основании сравнения определяются отклонения геометрии. С помощью 3D-сканирования возможно выполнить контроль геометрии внутренних поверхностей, однако для этого потребуется вскрыть внутреннюю полость, что для окончательно изготовленных деталей неприемлемо.

Рентген контроль

В отличие от описанных выше методов контроля с помощью рентген контроля возможен контроль внутренних поверхностей. При этом возможно выявить такие виды дефектов: несплошность материала, раковины, трещины, заливы элементов системы охлаждения, наличие остатков стержня, наличие посторонних предметов. Однако определение точного места расположения дефекта затруднено, поскольку на рентген пленке спинка и корыто проецируются на одну плоскость вследствие чего сказать где дефект на спинке или корыте просто невозможно. Выявление дефектов расположенных на ребрах, которые параллельны рентгеновскому лучу также невозможно. Контроль геометрических размеров не возможен. На рис. 1 представлены результаты рентген контроля рабочей лопатки турбовинтового двигателя (ТВД) с перспективной системой охлаждения.

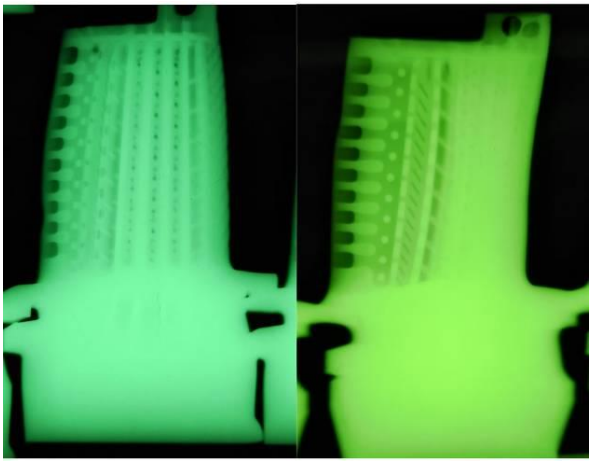

Рис. 1. Результаты рентген контроля

Объект исследования

Для отработки метода контроля внутренней полости с помощью компьютерной томографии подобрана рабочая лопатка ТВД с перспективной системой охлаждения (ранее забракованная при изготовлении). Схема подобранной лопатки представлена на рис. 2.

Система охлаждения рабочей лопатки (см. рис. 2) формируется пятью внутренними полостями 1, 2, 3, 4, 5, не имеющих между собой взаимного сообщения и разделёнными между собой поперечными рёбрами 6, 7, 8, 9. Каждая из внутренних полостей 1, 2, 3, 4, 5 состоит из каналов, соединённых между собой перемычками [1].

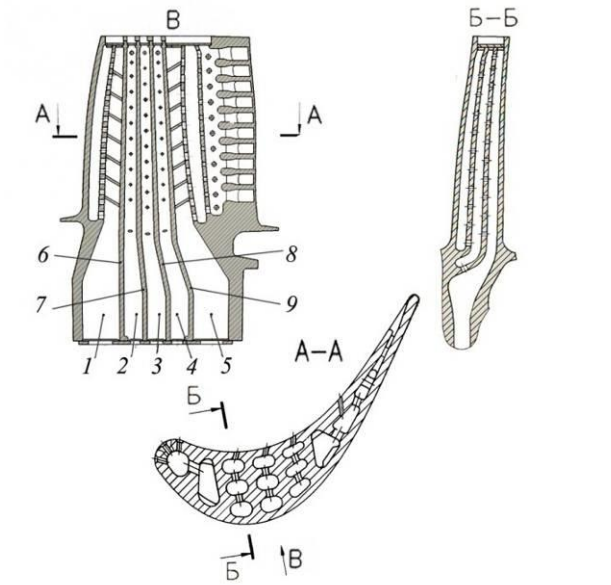

Рис. 2. Рабочая лопатка ТВД с перспективной системой охлаждения

На рис. 3 приведена изготовленная рабочая лопатка с перспективной системой охлаждения.

Рис. 3. Рабочая лопатка с перспективной системой охлаждения

Отработка метода контроля внутренней полости с помощью компьютерной томографии выполнена в рамках международного проекта «AERO.UA» в Институте технических войск (ITWL) г. Варшава на томографе X-Ray фирмы General Electric (рис. 4).

Результаты компьютерной томографии

В результате выполнения компьютерной томографии на исследуемой лопатке были выявлены такие дефекты:

– врезание в стенки (ребра) лопатки при выполнении перфорационных отверстий (рис. 5);

– смещение (выход) стрежня (рис. 6).

При этом соровые раковины в материале не видны, возможно, необходимо повышение качества сканирования, что влечет за собой увеличение время контроля.

С помощью программы VGStudio можно выполнить контроль геометрических размеров, заданных в чертеже. Однако для контроля геометрических размеров, заданных в чертеже, необходима дополнительная специальная оснастка для установки лопаток. Без оснастки совмещение системы координат контролируемой лопатки с системой координат в математической модели очень трудоемкий процесс, и не всегда возможен. Без совмещения системы координат (или без правильного позиционирования в программе VGStudio) контроль геометрических размеров, профиля пера и т.д. – невозможен или не показателен. Поэтому в данной работе контроль геометрических размеров не выполнялся.

Рис. 4. Томограф X-Ray фирмы General Electric

Рис. 5. Врезание перфорационных отверстий в стенки лопатки

При четкой визуализации границ детали контроль размеров в программе VGStudio возможен с точностью до 0,01 мм. Четкость границ зависит от качества сканирования. Качество сканирования зависит от габаритов детали, мощности лампы и времени сканирования [3].

ISSN 1727-7337 (print)
ISSN 2663-2217 (online)

Рис. 6. Смещение (выход) стержня

Программа VGStudio визуализирует расположение контролируемое сечение, при этом можно задавать необходимую координату сечения (рис. 7).

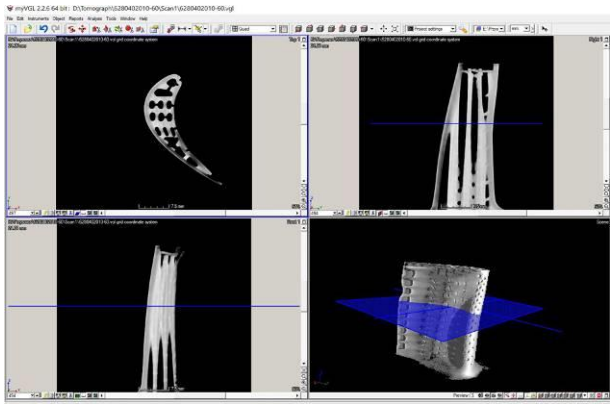

Рис. 7. Визуализация положения контролируемого сечения

Заключение

В результате проведенной работы отработана возможность контроля рабочих лопаток турбины с помощью компьютерной томографии.

При компьютерной томографии выявлены дефекты, которые невозможно выявить стандартными методами контроля.

С помощью компьютерной томографии возможно диагностировать детали как во время производства, так и во время ремонта. Получение точных данных при контроле деталей позволит изготавливать компоненты более сложной конструкции (например, каналы охлаждениия), что будет способствовать повышению эффективности двигателей и увеличению их срока службы. Возможность контроля лопаток при ремонте позволяет проверит их работоспособность и продлить срок службы, что снижает эксплуатационные расходы. Для того чтобы правильно выполнить проверку с помощью компьютерной томографии, необходимо установить много переменных. Их правильный выбор во многом зависит от опыта оператора.

Для контроля геометрических размеров необходимо дальнейшее проведение работ по отработке методологии контроля лопаток, в части позиционирования лопатки в томографе.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Артему Карпенко и Radosław Przysowa за поддержку при подготовке работы и за их комментарии к рукописи.

Литература

1. Разработка охлаждаемой рабочей лопатки ТВД с внутристеночной системой охлаждения [Текст] / Р. Ю. Шакало, Ю. В. Якушев, С. Б. Резник и др. // Вестник двигателестроения. – 2018. – №2. – С. 159-163.

2. Самохвалов, Н. Ю. Разработка методики контроля системы охлаждения лопаток турбин ГТД [Текст] / Н. Ю. Самохвалов, М. Д. Леванова, Д. А. Попов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 54. – С. 41-56.

3. Chalimoniuk, M. Evaluation of the decohesion effect on gas turbine blades with use of computed tomography [Text] / M. Chalimoniuk, A. Kułaszka // Przegląd Spawalnictwa R. 85. – 2013. – No. 12. – P. 42-45.

References

1. Shakalo, R. Yu., Yakushev, Yu. V., Reznik, S. B., Boris, S. B., Pridorozhnyi, R. P. *Razrabotka okhlazhdaemoi rabochei lopatki TVD s vnutristenochnoi sistemoi okhlazhdeniya* [Development of a cooled turbine blade with textural cooling system]. *Vestnik dvigatelestroeniya – Engine Bulletin*, 2018, no. 2, pp. 159-163.

2. Samokhvalov, N. Yu., Levanova, M. D., Popov, D. A. *Razrabotka metodiki kontrolya sistemy okhlazhdeniya lopatok turbin GTD* [Development of methods for monitoring the cooling system of turbine blades GTE]. Vestnik PNIPU. *Aerokosmicheskaya tekhnika – Bulletin PNRPU. Aerospace engineering*, 2018, no. 54, pp. 41-56.

3. Chalimoniuk, M., Kułaszka, A. Evaluation of the decohesion effect on gas turbine blades with use of computed tomography. *Przegląd Spawalnictwa R. 85*, 2013, no. 12, pp. 42-45.

Поступила в редакцию 5.06.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ВНУТРІШНЬОЇ ПОРОЖНИНИ ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ ЛОПАТОК ТВТ З ПЕРСПЕКТИВНИМИ СИСТЕМАМИ ОХОЛОДЖЕННЯ

Р. Ю. Шакало, М. Халімонюк

Охолоджувальні робочі лопатки турбіни є дуже складними, трудомісткими деталями, як для виготовлення, так і для контролю. З розвитком авіаційних газотурбінних двигунів ускладнюється і конструкція охолоджуваних робочих лопаток турбіни. Для створення нових перспективних охолоджуваних робочих лопаток турбіни потрібно впровадження нових передових технологій виготовлення і нових прогресивних методів контролю. У даній роботі розглянуті існуючі методи контролю, які застосовуються при виготовленні робочих лопаток турбіни в серійному виробництві. Наведено їх недоліки та переваги. Представлені результати робіт, проведених в рамках міжнародного проекту «AERO.UA». Роботи проводилися з метою відпрацювання, методу контролю внутрішньої порожнини робочої лопатки турбіна високого тиску (ТВТ) з перспективною системою охолодження, розробленою на ДП «Івченко-Прогрес». Контроль внутрішньої порожнини робочої лопатки ТВД з перспективною системою охолодження виконаний за допомогою комп'ютерної томографії. Комп'ютерна томографія проведена в Інституті технічних військ (ITWL) м. Варшава на томографі X-Ray phoenix V | tome | X m фірми General Electric. За результатами відпрацювання методу контролю показана можливість виявлення виробничих дефектів, виявлення яких в умовах сталого виробництва пов'язане з дуже трудомісткими контрольними операціями, а в деяких випадках контроль зовсім неможливий без руйнування деталі або без виконання дорогого ремонту. Виконано оцінку можливості, виконання контролю геометричних розмірів внутрішньої порожнини і зовнішніх поверхонь охолоджуваних робочих лопаток турбіни. При використанні комп'ютерної томографії контроль геометричних розмірів можливий з точністю до 0,01 мм. Але для прив'язки робочої лопатки до базових поверхонь, заданих в кресленні при скануванні необхідно використовувати спеціальне оснащення. Для підтвердження можливості контролю геометричних розмірів, заданих в кресленні необхідно продовжити роботи по скануванню охолоджуваних робочих лопаток турбіни із застосуванням спеціальних пристосувань.

Ключові слова: робоча лопатка; система охолодження; комп'ютерна томографія.

METHODS FOR INSPECTION OF INTERNAL STRUCTURE OF COOLED HPT BLADES WITH PERSPECTIVE COOLING SYSTEMS

R. Yu. Shakalo, M. Chalimoniuk

The cooled turbine blades are very complex, labor-intensive parts, both for manufacturing and for inspection. With the development of aviation gas-turbine engines, the design of cooled turbine blades is becoming more complicated. To create new promising cooled turbine blades requires the introduction of new advanced manufacturing technologies and new progressive methods of dimensional control. This paper discusses the existing methods of inspection, which are used in the manufacture of turbine blades in mass production. Their advantages and disadvantages are given. The results of the work carried out in the framework of the international project "AERO.UA" are presented. The work was carried out to develop the inspection method of the internal cavity of the high-pressure turbine (HPT) blade with a promising cooling system developed at Ivchenko-Progress. The inspection of the internal cavity of the HPT blade with a promising cooling system was performed using computed tomography. Computed tomography performed at the Air Force Institute of Technology (ITWL) Warsaw on the General Electric X-Ray phoenix V | tome | X m tomograph. According to the results of testing the inspection method, the possibility of identifying manufacturing defects, the detection of which under the conditions of steady-state production is associated with very labor-intensive operations, is shown, and in some cases, inspection is impossible at all without destroying the part or performing expensive repairs. An assessment was made of the possibility of monitoring the geometrical dimensions of the internal cavity and external surfaces of cooled turbine blades. With the use of computed tomography, the dimensional control is possible with an accuracy of 0.01 mm. But to bind the blades to the base surfaces specified in the drawing when scanning, you must use a special snap. To confirm the possibility of controlling the dimensions specified in the drawing, it is necessary to continue work on scanning the cooled turbine blades using special tools.

Keywords: working blade; cooling system; computed tomography.

Шакало Руслан Юрьевич – инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Марек Халимонюк – главный специалист, Завод авиационных двигателей, Технический Институт ВВС, Варшава, Польша.

Shakalo Ruslan Yurevich – design engineer of the 1st category of SE Ivchenko-Progress, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ShakaloRYu@zmdb.ua, ORCID Author ID: 0000-0003-4324-9191.

Marec Chalimoniuk – chief specialist, Division for aero-engines, Air Force Institute of Technology (AFIT), Warsaw, Poland,
e-mail: marek.chalimoniuk@itwl.pl, ORCID Author ID: 0000-0002-8950-4437, Scopus Author ID: 57163093800.